نشریهٔ مهندسی عمران فردوسی DOI: 10.22067/civil.v1i30.50689 سال سی‌ام، شمارهٔ یک، ۱۳۹٦

تأثیر شیب دیوارهٔ پایین‌دست بر ضریب آبگذری سرریز کنگره‌ای انحنادار★

میلادگودرزی[۱] مسعود قدسیان[۲] مجتبی مهرآئین[۳]

چکیده *سرریزهای کنگره‌ای از سازه‌های هیدرولیکی مهم در جهت تنظیم سطح آب و کنترل جریان در کانال‌ها، رودخانه‌ها و مخازن سدها به‌شمار می‌آید. نظر به اینکه در بعضی از سدها فضای کافی برای تعریض آنها به‌منظور افزایش دبی عبوری وجود ندارد لذا استفاده از سرریز کنگره‌ای یکی از بهترین راه‌حل‌های ممکن است. درصورتی‌که سیکل‌های سرریز کنگره‌ای خطی در مخازن سدها روی یک انحنا قرار بگیرد طول تاج آن افزایش می‌یابد و شرایط جریان ورودی بهبود می‌یابد و منجر به افزایش ضریب آبگذری می‌شود. پژوهش آزمایشگاهی حاضر، روند تغییرات ضریب آبگذری برای شیب‌های مختلف دیوارهٔ پایین‌دست سرریز را مورد بررسی قرار داده‌است. بدین منظور دو سرریز کنگره‌ای با زاویهٔ دیوارهٔ جانبی ٦ و ۱۱/۲۵ درجه و برای هر کدام چهار شیب دیوارهٔ پایین‌دست مورد آزمایش قرار گرفته‌است. براساس آزمایش‌ها و نتایج به‌دست آمده مشاهده شد شیب دیوارهٔ پایین‌دست سرریز باعث کاهش ضریب آبگذری می‌شود که دلایل آن در این مقاله به‌تفصیل آورده شده است. نتایج حاصل به‌صورت روند تغییرات ضریب آبگذری برحسب نسبت ارتفاع جریان به ارتفاع سرریز ارائه‌شده است، همچنین روند تغییرات ضریب آبگذری به شیب‌های مورد بررسی ارائه‌شده است. به‌منظور استفادهٔ طراحان این نوع سرریزها، رابطه‌ای برای تخمین ضریب آبگذری برای هر یک از شیب‌های مورد بررسی، ارائه‌شده است.*

واژه‌های کلیدی سرریز کنگره‌ای انحنادار، ضریب آبگذری، شیب دیوارهٔ پایین‌دست.

The Effect of Downstream Wall Slope of Curved Labyrinth Spillways on Discharge Coefficient

M. Goodarzi M. Ghodsian M. Mehraein

Abstract *Labyrinth Spillways are one of the hydraulic structures to regulate and control the flow of water in canals, rivers and reservoirs. In some situations, there is no enough space for increasing the length of the weir to increase the discharge. Therefore, labyrinth spillways are one of the solutions for this problem. If the cycle of linear labyrinth spillway is located on the curve, then the crest length increases, and as a result the inlet flow condition is improved and the hydraulic coefficient increases. In this laboratory study, the discharge coefficient for different downstream wall slopes is studied. 2 different spillways with side-wall angle* (6° *and 11/25°*) and *4 downstream wall slope are studied. The results indicate that downstream wall sloping reduces the hydraulic coefficient. Discharge coefficient variations with downstream slope and flow height on spillway crest were studied. Different equations were presented to estimate the discharge coefficient of the spillway by considering the downstream slope.*

Key Words Labyrinth Spillway, Arc Labyrinth Spillway, Hydraulic Coefficient, Downstream Wall Slope.

★ تاریخ دریافت مقاله ۹٤/۷/۲۵ و تاریخ پذیرش آن ۹۵/۹/۳۰ می‌باشد.

(۱) فارغ التحصیل گروه مهندسی آب، دانشکدهٔ عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.

(۲) نویسندهٔ مسئول، استاد پژوهشکدهٔ آب دانشگاه تربیت مدرس، تهران. Email: ghods@modares.ac.ir

(۳) استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه خوارزمی، تهران.

مقدمه

سرریزهای کنگره‌ای از دیوارهای متصل به هم با هندسهٔ مثلثی، ذوزنقه، مستطیلی و یا قوسی تشکیل‌شده است و با تناوب در عرض جریان تکرار می‌شود [۱]. براساس بررسی‌های انجام‌شده در صورتی که در طراحی یک سد، سیل بیشینه بیشتر از سیل طرح اولیه باشد و سرریز آن سد نیز توانایی عبور این مقدار بیشینه دبی را نداشته باشد یک راه‌حل فنی و اقتصادی برای حل این مشکل استفاده از سرریز کنگره‌ای می‌باشد. سرریز کنگره‌ای در یک عرض معین طول تاج بیشتری نسبت به سرریز متداول خطی دارند [2].

دبی جریان عبوری از سرریز کنگره‌ای را می‌توان با رابطهٔ (۱) به‌دست آورد

$$Q = \frac{2}{3} c_d L_c H_0^{\frac{3}{2}} \sqrt{2g} \qquad (۱)$$

در رابطهٔ (۱) L_c طول مؤثر تاج، c_d ضریب آبگذری، Q دبی عبوری از روی سرریز، g شتاب ثقل زمین و H_0 عمق هیدروستاتیکی کل است. باتوجه به محدود بودن عرض کانال یا مخزنی که سرریز در آن نصب شده‌است، به‌منظور افزایش ظرفیت تخلیهٔ سرریز، افزایش L_C به‌وسیلهٔ کنگره‌ای کردن و ایجاد یک سرریز غیرخطی، یکی از مناسب‌ترین راه‌ها است [3].

سرریز کنگره‌ای انحنادار (Arc Labyrinth Spillway) بیشترین میزان کارایی خود را در مخازن سدها نشان می‌دهد، زیرا استفاده از این نوع سرریزها، علاوه بر افزایش طول، افزایش ضریب آبگذری را در پی خواهد داشت. کارایی این نوع سرریز در بارهای هیدرولیکی کم قابل‌توجه است، چرا که افزایش ضخامت تیغهٔ آب بر روی سرریز، تداخل جریان و کاهش ضریب آبگذری را در پی خواهد داشت و درنتیجه باعث می‌شود که انحنادار کردن سرریز کنگره‌ای تأثیر قابل‌توجهی بر ظرفیت آبگذری نداشته و دبی عبوری از روی این نوع سرریز با سرریز مستقیم تفاوت قابل‌ملاحظه‌ای نداشته باشند [4].

تحقیقات نشان‌داده است که ظرفیت آبگذری سرریز کنگره‌ای انحنادار به‌علت بهبود جهت‌گیری جریان از سرریز کنگره‌ای بیشتر است [5,6]. با توجه به آزمایش‌ها و تحقیقات انجام‌شده با افزایش ارتفاع تیغهٔ عبوری جریان روی سرریز برخورد و تداخل لایه‌های جریان بیشتر می‌شود و در ابتدا افزایش اندکی در آبگذری به‌وجود می‌آید و به دنبال افزایش نسبت $\frac{H}{P}$ (P ارتفاع سرریز می‌باشد) کاهش ضریب آبگذری بیشتر خواهد بود. ضریب آبگذری سرریز معمولی با تاج نیم‌دایره ۲۰ درصد نسبت به سرریز با تاج لبه‌تیز بیشتر می‌باشد [7]. دبی تخلیهٔ سرریز کنگره‌ای انحنادار در یک شرایط مطلوب از نظر جهت‌گیری و حرکت جریان می‌تواند بیشتر از سرریز کنگره‌ای کلاسیک باشد [8]. تحقیقات پیشین منجر به ارائهٔ روشی برای طراحی سرریزهای کنگره‌ای مثلثی و ذوزنقه‌ای برمبنای تحلیل ابعادی شد [9]. ارتفاع کل جریان، طول مؤثر تاج و ضریب آبگذری پارامترهای مؤثر بر دبی سرریز کنگره‌ای ذوزنقه‌ای و مثلثی می‌باشند و ضریب آبگذری نیز تحت تأثیر زاویهٔ دیوارهای سرریز (α)، نوع تاج، ضخامت دیوار سرریز، ارتفاع سرریز و ارتفاع کل جریان می‌باشد [10]. بررسی هوادهی سرریزهای کنگره‌ای مثلثی و مستطیلی نشان داد که سرریز کنگره‌ای مستطیلی در مقایسه با شکل مثلثی و شکل مثلثی آن نیز در مقایسه با خطی از کارایی بالاتری برای هوادهی جریان برخوردار است [11]. آزمایش‌های انجام‌شده روی سرریز کنگره‌ای ذوزنقه شکل نشان داد که با افزایش زاویهٔ سرریز کنگره‌ای با راستای اصلی جریان (α) دبی کاهش می‌یابد و سرریزهای کنگره‌ای در مقایسه با سرریزهای مستقیم کمتر مستغرق می‌شوند [12]. با انجام مطالعهٔ آزمایشگاهی جریان بر روی سرریزهای کنگره‌ای ذوزنقه‌ای شکل، برای زاویهٔ دیوار جانبی سرریز از 8° تا 30°، دسته‌ای دیگر از منحنی‌های ضریب آبگذری در مقابل $\frac{H_0}{P}$ نیز ارائه‌شده است [13]. مطالعات نشان داد که در یک α ثابت در مقادیر کوچک $\frac{H_0}{P}$ ایجاد انحنا باعث افزایش C_d می‌شود و در مقادیر بزرگ‌تر

زاویهٔ داخلی سرریز θ (شکل ۱)، نتایج مطلوب‌تری به‌دست می‌آید. تحقیق انجام‌شده، نشان داد از یک مقدار خاص $\frac{H_0}{P}$ انحنادار کردن سرریز مطلوب نیست و ضریب آبگذری کمتر از حالت خطی خواهد شد [14]. بررسی تأثیر تعداد سیکل‌ها بر روی ضریب آبگذری نشان داد که تغییر تعداد سیکل‌ها تأثیر کمی روی ضریب آبگذری دارد و دلیل آن شرایط هواگیری تیغهٔ آب و درصدی از طول سرریز است که هواگیری می‌شود [15]. بیات و همکاران تأثیر شیب کف پایین‌دست آستانه‌های کنگره‌ای بر روی عملکرد هیدرولیکی را بررسی نمودند. نتایج به‌دست آمده بر روی مدل سرریز کنگره‌ای با پلان مثلثی نشان داد که برای بلندای کم و متوسط جریان، ضریب دبی با افزایش شیب پایین‌دست کاهش می‌یابد، ولی در بلنداهای زیاد برعکس خواهد بود. در مدل سرریز کنگره‌ای با پلان ذوزنقه باتوجه به آزمایش‌های صورت‌گرفتهٔ ایشان می‌توان نتیجه گرفت که ضریب دبی مستقل از شیب پایین‌دست آستانه است، و یا به‌علت پیچیدگی‌های هیدرولیکی جریان بر روی این آستانه در مقایسه با آستانه‌های با پلان مثلثی رابطه ساده‌ای بین شیب پایین‌دست آستانه و در مقابل ضریب دبی وجود ندارد [١٦]. اژدری مقدم و همکاران با بررسی شیب دیوارهٔ پایین‌دست بر روی سرریز کنگره‌ای به این نتیجه رسیدند که کاهش شیب مقطع باعث کاهش هد کل جریان برای دبی ثابت می‌شود و در نتیجه افزایش ضریب آبگذری را در پی خواهد داشت [١٧]. تأثیر شیب بالادست سرریز کنگره‌ای انحنادار نیز در مرجع [١٨] بررسی‌شده است.

با توجه به مطالعاتی که تاکنون در مورد سرریزهای کنگره‌ای انحنادار انجام‌شده است می‌توان نتیجه گرفت که تحقیقات در این مورد در مراحل ابتدایی است. از سویی دیگر تا به حال تحقیقی در مورد تأثیر شیب دیواره‌های پایین‌دست بر ضریب آبگذری این نوع سرریزها انجام‌نشده است و لازم است در این مورد مطالعات تکمیلی انجام شود. در تحقیق حاضر به بررسی تأثیر شیب دیوارهٔ پایین‌دست بر ضریب آبگذری این نوع سرریزها با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی می‌پردازیم.

تحلیل ابعادی

دبی عبوری از یک سرریز کنگره‌ای انحنادار تابعی از عوامل ارائه‌شده در رابطهٔ (۲) می‌باشد.

$$Q_{cycle} = f(A, w, P, t_w, H_0, \alpha, \theta, l, g, S) \qquad (۲)$$

H_0 ارتفاع کل جریان در بالادست، g شتاب ثقل، P ارتفاع سرریز، S شیب دیواره‌های پایین‌دست، $l = 2l_c + 4A$ (طول یک سیکل از سرریز)، θ زاویهٔ انحنای سیکل، α زاویهٔ دیواره‌های پایین‌دست، t_w ضخامت سرریز ، A نصف سیکل، Q_{cycle} دبی عبوری از هر سیکل و w طول انحنای یک سیکل می‌باشد که این پارامترها در شکل (۱) نشان داده شده‌است. با استفاده از آنالیز ابعادی رابطهٔ (۲) را می‌توان به صورت ذیل نوشت.

$$\frac{Q_{cycle}}{lH_0\sqrt{GH_0}} = f(\frac{A}{w}, \frac{w}{P}, \frac{l}{w}, \theta, \frac{t_w}{P}, \frac{H_0}{P}, S) \qquad (۳)$$

حال با توجه به رابطهٔ عمومی سرریزها:

$$Q_{cycle} = \frac{2}{3} c_d l H_0^{1.5} \sqrt{2g} \qquad (٤)$$

با مقایسهٔ رابطهٔ (۳) و (٤) ضریب آبگذری تابعی از پارامترهای ارائه‌شده در رابطهٔ (۵) خواهد شد.

$$c_d = f(\frac{A}{w}, \frac{w}{P}, \alpha, \theta, \frac{t_w}{P}, \frac{l}{w}, \frac{H_0}{P}, S) \qquad (۵)$$

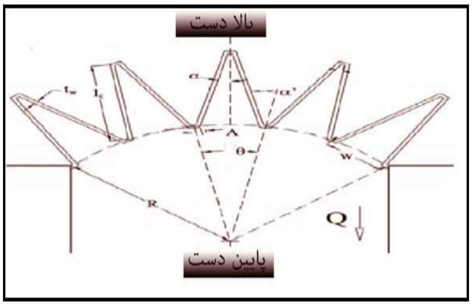
با توجه به اینکه پارامترهای t_w, A, w, P در این آزمایش‌ها ثابت است، α و $\frac{l}{w}$ نیز دارای مفاهیم یکسان‌اند و مستقل از هم نیستند بنابراین روند تغییرات ضریب آبگذری با تغییر S ، α و $\frac{H_0}{P}$ بررسی می‌شود.

تجهیزات آزمایشگاهی

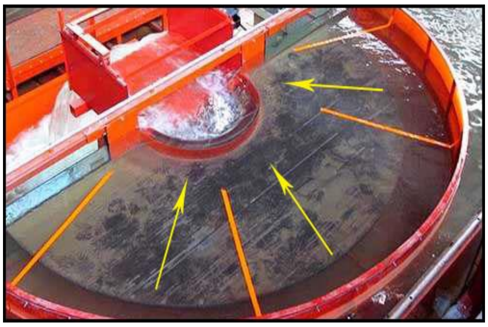
آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس انجام شد. سرریز کنگره‌ای ساخته‌شده در کانالی به عرض ۲ متر، طول ۱۰ متر، عمق ۹۰ سانتی‌متر و بر

روی یک میز قرار گرفته است. همان‌طور که در شکل (۲) توسط ربان‌های رنگی نشان داده‌شده است، در تنظیمات آزمایشگاهی به‌کار رفته، جهت‌گیری جریان مشابه جهت گیری جریان در مخزن است. جریان آب همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود از دو جهت توسط دو پمپ به کانال تزریق می‌شود، هنگامی که سطح آب در کانال بالا آمد جریان ابتدا از روی سکوی نیم‌دایره‌ای تعبیه‌شده بر روی کانال عبور می‌کند. زمانی که ارتفاع آب به اندازهٔ ارتفاع میزی که سیکل‌های سرریزهای کنگره‌ای روی آن قرار دارند (شکل ٤- الف و ب) رسید جریان آب از روی میز عبور می‌کند و به داخل سیکل‌ها می‌ریزد. در ادامه جریان آب پس از عبور از سرریز به داخل مخزن زیر زمینی می‌ریزد و دوباره توسط پمپ به کانال منتقل می‌شود (شکل ۵).

دبی توسط دو پمپ تأمین شد. هر پمپ حداکثر تا ۱۲۰ لیتر بر ثانیه ظرفیت دارد. اندازه‌گیری دبی به‌وسیلهٔ دبی‌سنج دیجیتالی انجام شد. اندازه‌گیری ارتفاع آب روی سرریزها به‌وسیلهٔ عمق‌سنج دیجیتالی با دقت ۰/۱ میلی‌متر انجام شد. سرریزها از جنس پلکسی گلاس، در ۵ سیکل (N=5)، که در اینجا N تعداد سیکل‌ها است، با ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر ساخته شده‌اند و تاج سرریز کنگره‌ای به‌صورت نیم‌دایره‌ای بود. درمجموع ۲۰۰ آزمایش برای ۱۰ شکل متفاوت سرریز، با ٤ شیب پایین‌دست در شرایطی که $\alpha = 6^{\circ}$، $\theta = 27.4^{\circ}$ و ٤ شیب پایین‌دست دیگر نیز برای $\alpha = 11.25^{\circ}$، $\theta = 27.4^{\circ}$ انجام شد. پلان سرریز کنگره‌ای انحنادار و پارامترهای مربوط به آن در شکل (۱) نشان داده‌شده است. جزئیات سرریزها در جدول (۱) ارائه‌شده است.



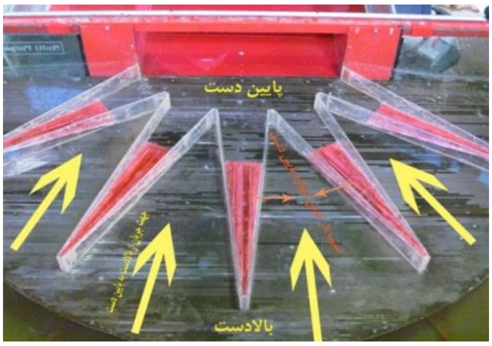
شکل ۱ پروفیل سرریز کنگره‌ای انحنادار



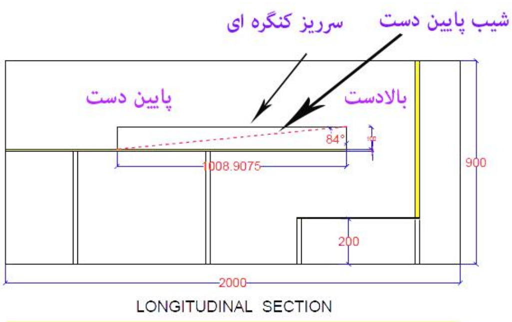
شکل ۲ جهت‌گیری جریان در شبیه‌ساز مخزن



شکل ۳ تجهیزات آزمایشگاهی برای شبیه‌سازی مخزن

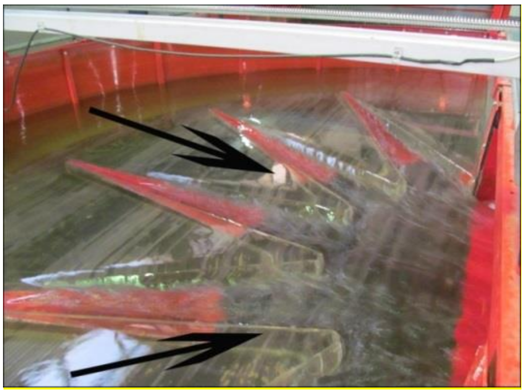


(الف)



(ب)

شکل ٤ نمایی از سرریز و جهت جریان: الف) پلان و ب) مقطع طولی



شکل ۵ نمایی دیگر از سرریز، شیب پایین‌دست و شکل‌گیری جریان بر روی سرریز (بستر شیب‌دار با رنگ قرمز مشخص شده است)

جدول ۱ خصوصیات کامل سرریزهای مورداستفاده در آزمایش‌ها

شیب پایین دست	N (–)	W (m)	L (m)	θ (^{0})	α (^{0})	انواع سرریز
–	۵	۱	۱۰/۳۹	۲۷/٤	٦	۱
۸٤	۵	۱	۱۰/۳۹	۲۷/٤	٦	۲
۸۲	۵	۱	۱۰/۳۹	۲۷/٤	٦	۳
۷۹	۵	۱	۱۰/۳۹	۲۷/٤	٦	٤
٦۸	۵	۱	۱۰/۳۹	۲۷/٤	٦	۵
–	۵	۱	۵/۷	۲۷/٤	۱۱/۲۵	٦
۸۰	۵	۱	۵/۷	۲۷/٤	۱۱/۲۵	۷
۷٦	۵	۱	۵/۷	۲۷/٤	۱۱/۲۵	۸
۷۰	۵	۱	۵/۷	۲۷/٤	۱۱/۲۵	۹
۵۳	۵	۱	۵/۷	۲۷/٤	۱۱/۲۵	۱۰

مشاهدات و نتایج

به‌منظور بررسی اثر شیب پایین‌دست سرریز کنگره‌ای انحنادار در مخزن، مجموعاً ۸ شیب مورد آزمایش و بررسی قرارگرفته است. در تعدادی از آزمایش‌ها تعدادی از H_0 های مورد بررسی کمتر از ۲/۵ سانتی‌متر بوده است بنابراین با توجه به مطالعات پیشین در محدودهٔ کشش سطحی قرار گرفتند و باید ضریب آبگذری مربوط به آنها اصلاح شود [19]. بدین منظور برای حذف اثر کشش سطحی در این شرایط از رابطهٔ (٦) استفاده شد [20].

$$C_d = C_l - \frac{1}{H_t} \quad (٦)$$

که در این رابطه C_l ضریب آبگذری از رابطهٔ (۱) محاسبه می‌شود و H_t ارتفاع کل جریان در بالادست سرریز و برحسب میلی‌متر می‌باشد.

محدودهٔ دبی جریان برای بررسی شیب‌دیواره پایین‌دست ۲۹ تا ۱۷۹ لیتر بر ثانیه بوده است. مشاهدات قابل ذکر در بررسی اثر شیب پایین‌دست عبارتند از:

۱. درمقادیر کم $\frac{H_0}{p}$ برای سرریز کنگره‌ای با شیب دیوارهٔ پایین‌دستی که از تاج تا انتهای سیکل کشیده‌شده است در رأس (اپکس) پایین‌دست سرریز گردابه‌هایی به‌وجود می‌آید، این گردابه‌ها باعث کاهش ضریب آبگذری جریان می‌شود و از یک بلندای جریان به بعد محو می‌شوند. گردابه‌ها با دایره در شکل (٦) نشان داده‌شده است.

۲. در مقادیر کم $\frac{H_0}{p}$ برای سرریز کنگره‌ای با شیب دیوارهٔ پایین‌دستی که از تاج تا سه‌چهارم سیکل کشیده شده‌است، در رأس (اپکس) پایین‌دست سرریز گردابه‌هایی به‌وجود می‌آید. این گردابه‌ها باعث کاهش ضریب آبگذری جریان می‌شود و با افزایش بلندای جریان به‌تدریج محو می‌شوند.

۳. در سرریز با $\alpha = 6^{\circ}$ هواگیری جریان دیده نمی‌شود.

٤. شیب‌دار کردن دیوارهٔ پایین‌دست همان‌طور که در شکل (۷) دیده می‌شود باعث افزایش طول ناحیهٔ تداخل جریان عبوری از سیکل‌ها نسبت به حالت بدون شیب می‌شود (طول ناحیهٔ تداخل طولی است که جریان‌های عبوری از روی تاج سرریز به هم برخورد می‌کند).

۵. در سرریز با $\alpha = 11/25^{\circ}$ در محدوده‌ای که شیب دیوارهٔ پایین‌دست امتداد دارد مانع از هواگیری می‌شود.

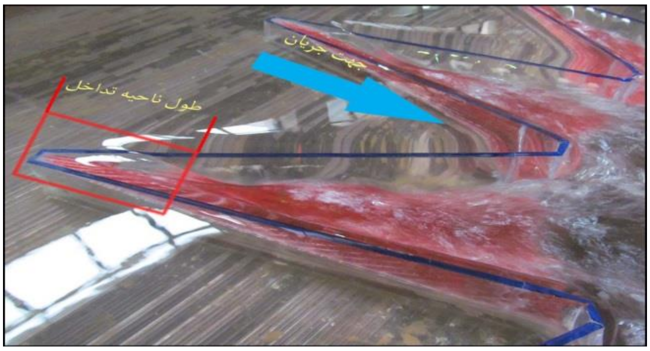
٦. با افزایش شیب پایین‌دست هواگیری در بلندای جریان کمتری اتفاق می‌افتد.

تغییرات دبی عبوری و ضریب آبگذری نسبت به بلندای جریان برای سرریز کنگره‌ای با دیوارهٔ پایین‌دست شیب‌دار به‌ترتیب در شکل (۹) و (۱۰) نشان داده‌شده است. مطابق شکل (۹) و (۱۰) سرریز با شیب پایین‌دست، دارای دبی و ضریب آبگذری کمتری نسبت به شرایط بدون شیب است زیرا شیب‌های پایین‌دست مانند یک مانع در مقابل جریان عمل می‌کند، در نتیجه باعث افزایش اختلاط جریان می‌شود و کاهش ضریب آبگذری را در پی خواهد داشت. در صورتی که شیب، تاج سرریز را به سه‌چهارم از طول سیکل و یا بیشتر از آن وصل کند گردابه همان‌طور که در شکل (٦) نشان داده شده است نیز در رئوس پایین‌دست ایجاد می‌گردد و باعث کاهش ضریب آبگذری می‌شود، درضمن در سرریز با $\alpha = 11.25^{\circ}$ شیب‌دار کردن دیوارهٔ پایین‌دست مانع از هواگیری جریان می‌شود و کاهش ضریب آبگذری را در پی خواهد داشت. بیشترین تفاوت بین دبی و ضریب آبگذری برای سرریز با شیب پایین‌دست با حالت بدون شیب، مربوط به مقادیر $\frac{H_0}{P}$ کم است. با افزایش $\frac{H_0}{P}$ اثر شیب‌ها کم می‌شود تا آنجا که شیب‌ها اثری روی ضریب آبگذری نخواهند گذاشت.

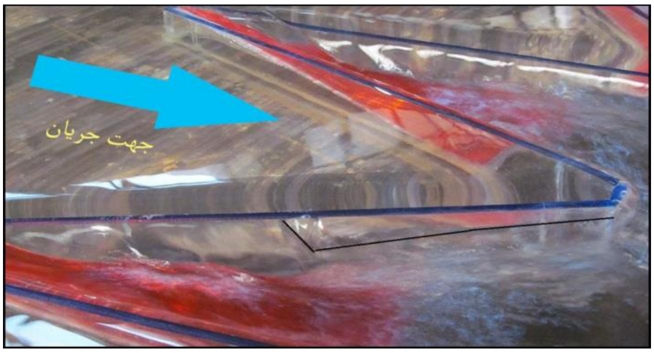
برای هر یک از شیب‌های مورد بررسی بیشترین درصد کاهش در دبی، در اثر شیب پایین‌دست نسبت به حالت بدون شیب در جدول (۲) آورده‌شده است.



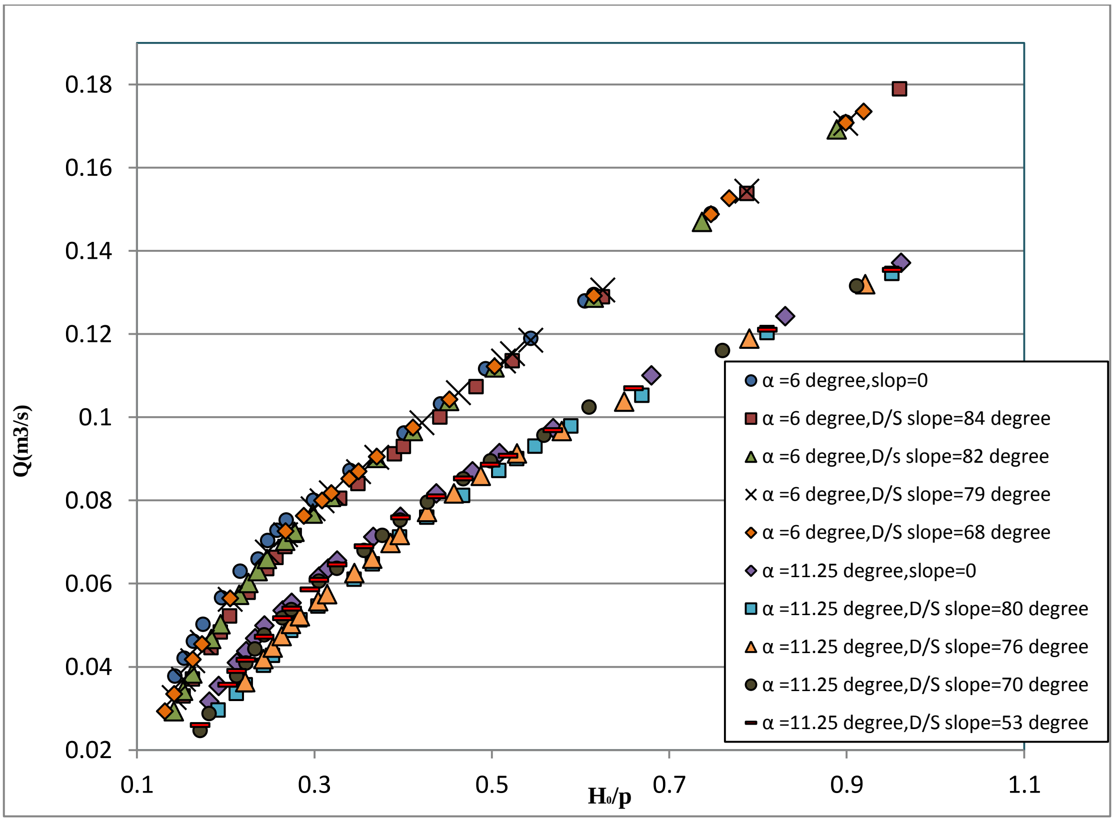
شکل ٦ گردابه‌های به‌وجودآمده در اثر شیب دیوارهٔ پایین‌دست $Q = 40\frac{lit}{s}$



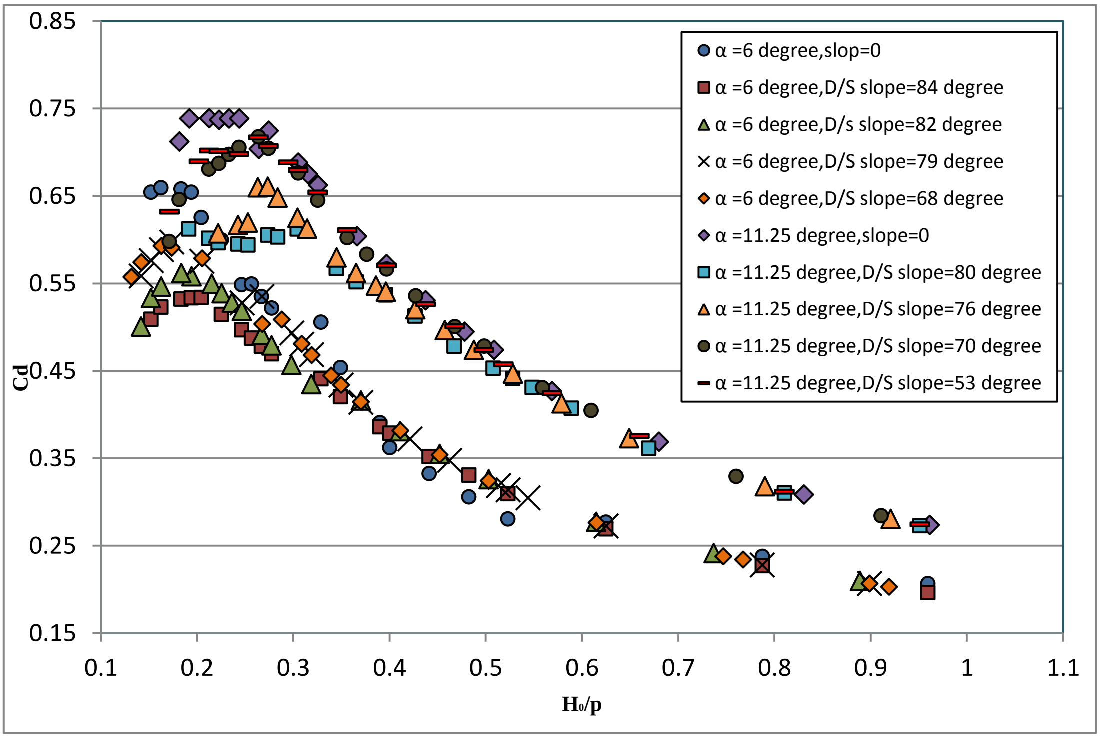
شکل ۷ تأثیر شیب‌دار کردن بر جریان عبوری از سرریز کنگره‌ای انحنادار $Q = 62\frac{lit}{s}$



شکل ۸ هواگیری جریان تا ابتدای شیب‌ها در $Q = 42\frac{lit}{s}$



شکل ۹ تغییرات دبی با $\frac{H_0}{P}$ برای سرریزها با $\alpha = 6^{\circ}$ و $\alpha = 11.25^{\circ}$ و مقادیر مختلف شیب پایین‌دست



شکل ۱۰ ضریب آبگذری در مقابل $\frac{H_0}{P}$ برای سرریزها با $\alpha = 6^{\circ}$ و $\alpha = 11.25^{\circ}$ در شیب‌های پایین‌دست متفاوت

جدول ۲ بیشترین درصد کاهش دبی بر اثر شیب‌دار کردن دیواره پایین‌دست

	شیب‌ها (درجه)	بیشترین درصد کاهش
$\alpha = 6^{\circ}$	۸٤	٤٥/٤
	۸۲	٤۰/۹
	۷۹	۱۹
	٦۸	۱٦/۷
$\alpha = 11.25^{\circ}$	۸۰	۲٤/٤
	۷٦	۱٦/۸
	۷۰	۱٤/۳
	۵۳	۷/٤

همان‌طور که در شکل (۹) و جدول (۲) نیز مشاهده می‌شود شیب دیوارهٔ پایین‌دستی که تاج را به ابتدای سیکل متصل می‌کند در شیب ۸٤ درجه دارای درصد کاهش بیشتری در دبی نسبت به بقیهٔ شیب‌ها است زیرا طول تداخل همان‌طور که در شکل (۷) نشان داده شده‌است، در این شیب نسبت به شیب‌های دیگر بیشتر است، در ضمن در بلندای کم جریان در این شیب در رئوس پایین‌دست گردابه دیده می‌شود. در شیبی که تاج را به وسط سیکل وصل می‌کند به افزایش شیب و طول کمتر، گردابه‌ای دیده نمی‌شود بنابراین بیشترین درصدِ کاهش آن نسبت به شیب‌های دیگر کمتر است.

با مقایسهٔ مقادیر درصد کاهش به‌دست آمده در جدول (۲) و شکل (۱۰) مشاهده می‌شود که بیشترین درصد کاهش در $\alpha = 6^{\circ}$ (٤٥/۳۷ درصد) خیلی بیشتر از بیشترین درصد کاهش در $\alpha = 11.25^{\circ}$ (۲٤/۳٦ درصد) است، زیرا این زاویه دارای طول ناحیهٔ تداخل بیشتری است، در ضمن گردابه‌های ایجادشده در آن نیز بزرگ‌تر هستند.

شکل (۱۱) ضریب آبگذری را در مقابل شیب‌های پایین‌دست مورد بررسی برای $\alpha = 11.25^{\circ}$ و $\alpha = 6^{\circ}$ در بلندای مختلف جریان نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۱۱) دیده می‌شود در بلندای کم جریان، شیب منحنی نزولی است که نشان‌دهندهٔ این است که شیب پایین‌دست باعث کاهش ضریب آبگذری می‌شود. با افزایش بلندای جریان شیب منحنی تقریباً صفر می‌شود که نشان‌دهندهٔ عدم تأثیر شیب روی ضریب آبگذری است.

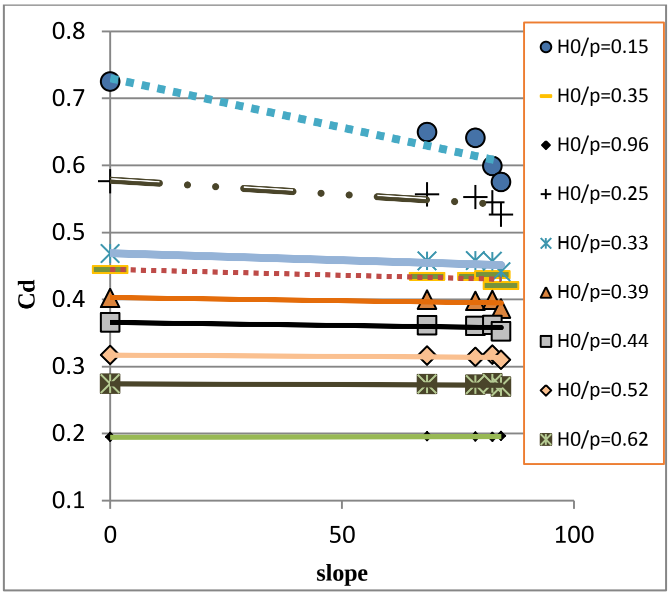
معادلهٔ کلی ضریب آبگذری برای سرریزهای مورد بررسی با شیب دیوارهٔ پایین‌دست برای محدودهٔ $0/13 \le \frac{H_0}{P} \le 0/96$ به صورت زیر است.

$$c_d = a\left(\frac{H_0}{P}\right)^3 + b\left(\frac{H_0}{P}\right)^2 + c\left(\frac{H_0}{P}\right) + d \qquad (۷)$$

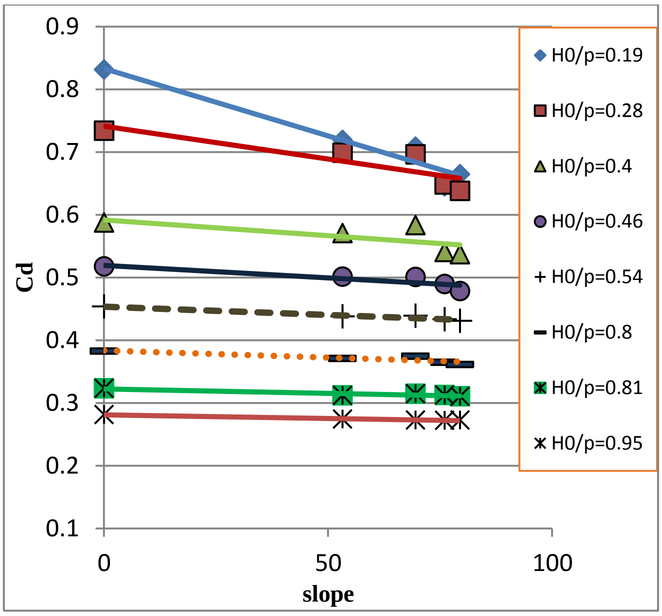
ضرایب a، b، c و d بر اساس زاویهٔ α و شیب مورد نظر از جدول (۳) به‌دست می‌آیند. به‌منظور رسم این منحنی‌ها و استخراج معادلات و ضرایب مربوط از نرم‌افزار Exel2010 استفاده شد. بر این اساس پس از وارد کردن داده‌های مورد نظر این برنامه منحنی‌های مختلفی از مجموعه نقاط داده‌شده عبور داده و معادله و ضریب همبستگی آن با روش مجموع حداقل مربعات ارائه می‌شود. مقادیر بالای ضریب همبستگی (R^2) بین مقادیر اندازه‌گیری‌شده و محاسباتی نشان می‌دهد که شکل معادله و ضرایب و توان‌های به‌دست آمده به‌درستی و با دقت بالایی انتخاب‌شده است.

در انتهای این مقاله مقایسه‌ای بین سرریز و شیب‌های بررسی‌شده در این تحقیق با سرریز خطی بررسی‌شده در مخزن توسط تولیس و کرکستون ۲۰۱۲ انجام می‌شود. ضریب آبگذری سرریز کنگره‌ای انحادار در یک شرایط مطلوب از نظر جهت‌گیری و حرکت جریان می‌تواند بهتر از سرریز کنگره‌ای خطی باشند [3,4,8]. بر اساس شکل (۱۲) و (۱۳) و مطابق تحقیقات پیشین مشاهده می‌شود که ضریب آبگذری در سرریز کنگره‌ای انحادار در بلندای کم جریان دارای تفاوت نسبتاً زیادی با سرریز کنگره‌ای خطی می‌باشد ولی با افزایش بلندای جریان این تفاوت کاهش می‌یابد [4].

دلیل آن این است که با افـزایش بلنـدای جریـان میـزان اختلاط در سرریز کنگره‌ای انحادار در یک دبـی ثابـت بیشتر از میزان اختلاط در سرریز کنگـره‌ای خطـی مـی-شود و همچنین با افزایش بلندای جریان شکل تاج تأثیر کمتری بر جریان عبوری از سرریز خواهد داشت.

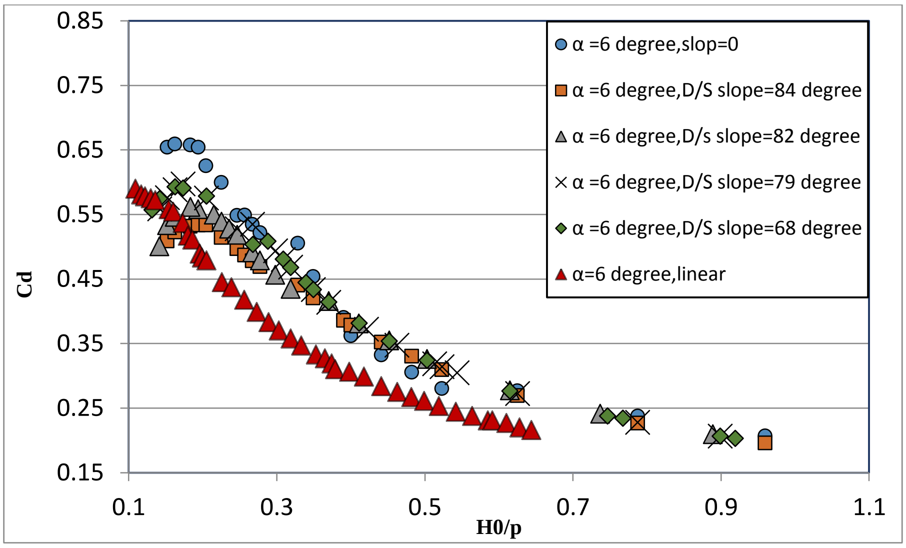


(الف)

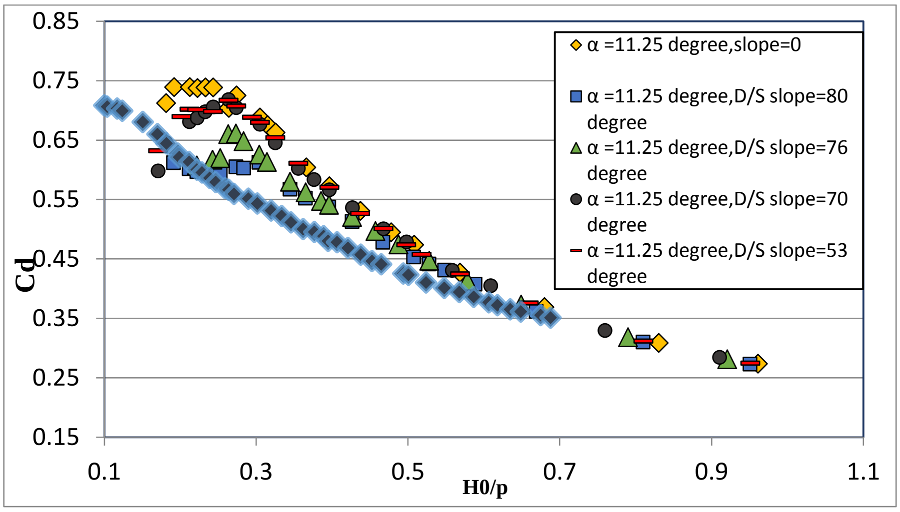


(ب)

شکل ۱۱ نمودار تغییرات ضریب آبگذری در مقابل شیب‌های مورد بررسی در بلندای جریان مختلف



شکل ۱۲ مقایسه ضریب آبگذری برای سرریز و شیب‌های بررسی‌شده با مقادیر به‌دست‌آمده برای سرریز خطی در حالت α=6 درجه [4]



شکل ۱۳ مقایسه ضریب آبگذری برای سرریز و شیب‌های بررسی‌شده با مقادیر به‌دست‌آمده برای سرریز خطی در حالت α=12 درجه [4]

جدول ۳ ضرایب مربوط به ضریب آبگذری برای شیب‌های دیوارهٔ پایین‌دست

	slope	a	b	c	d	R^2
$\alpha = 6^\circ$	۸۴	۰/۶۷	−۰/۶۵	−۰/۴۲	۰/۶۲	۰/۹۸
	۸۲	۱/۴	−۱/۷۲	۰/۰۱	۰/۵۸	۰/۹۶
	۷۹	۱/۱۳	−۱/۱۵	−۰/۳۷	۰/۶۷	۰/۹۸
	۶۸	۰/۷۴	−۰/۶۴	−۰/۵۴	۰/۶۸	۰/۹۸
$\alpha = 11.25^\circ$	۸۰	۱/۶۳	−۲/۶۱	۰/۷۱	۰/۵۶	۰/۹۹
	۷۶	۱/۶۸	−۲/۴۹	۰/۸۴	۰/۶۴	۰/۹۷
	۷۰	۳/۷۱	−۵/۸	۲	۰/۴۷	۰/۹۴
	۵۳	۲/۷۸	−۴/۲۸	۱/۲۴	۰/۵۹	۰/۹۶

نتایج

۱. شیب پایین‌دست سرریز کنگره‌ای انحنادار باعث کاهش سودمندی سرریزهای کنگره‌ای می‌شود زیرا شیب مانند یک مانع در برابر جریان عمل می‌کند و مانع از ریزش جریان می‌گردد و افزایش اختلاط جریان نتیجهٔ آن خواهد بود.

۲. در صورتی که شیب پایین‌دست تا انتهای سیکل کشیده شود علاوه بر اینکه باعث افزایش اختلاط جریان می‌شود، در رئوس پایین‌دست سرریز گردابه‌هایی ایجاد می‌شود که باعث کاهش دبی جریان عبوری از سرریز در شرایط یکسان می‌شود. بنابراین ایجاد این نوع شیب در پایین‌دست سریز نسبت به شیب‌های دیگر که در طول‌های کمتر اجرا شده‌اند توصیه نمی‌شود.

۳. با افزایش شیب پایین‌دست از شیبی که تاج سرریز را به وسط طول سیکل پایین‌دست متصل می‌کند، گردابه در رئوس پایین‌دست دیده نمی‌شود.

٤. شیب پایین‌دست سرریز کنگره‌ای انحنادار در بدترین حالت مربوط به حالتی است که سرریز دارای $\alpha = 6^{\circ}$ بوده و شیب از روی تاج تا انتهای سیکل کشیده شده باشد. در بدترین حالت دبی حدود ٤٥/٤ درصد کاهش خواهد داشت.

۵. شیب پایین‌دست باعث افزایش ارتفاع جریان روی سرریز در یک دبی ثابت نسبت به حالت بدون شیب می‌شود.

٦. با افزایش بلندای جریان رفته‌رفته اثر شیب‌دار کردن بر ضرایب آبگذری کاهش می‌یابد.

۷. رابطه‌ای جدید برای محاسبهٔ ضریب آبگذری سرریز کنگره‌ای برای شیب‌های مختلف دیوار سرریز ارائه‌شده است که با توجه به محدودیت‌های ارائه‌شده در این تحقیق که مربوط به پارامترهای بدون بعد می‌باشند قابل استفاده است.

مراجع

۱. یاسی، مهدی و محمدی، محمد، «بررسی سرریزهای زیگزاکی با پلان قوسی»، علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، شمارهٔ ٤۱، (۱۳۸٦).

2. Tacail, F.G., Evans, B. and Babb, A., "Case Study of a labyrinth Weir Spillway", *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 17, pp. 1-7, (1990).

3. Falvey, H.T., "Hydraulic Design of Labyrinth Weirs", ASCE Press (American Society of Civil Engineers), (2003).

4. Crookston, B. and Tullis, B.P., "Arced Labyrinth Weirs", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 138, pp. 555-562, (2012).

5. Copeland, R. R. and Fletcher, B.P., "Model Study of Prado Spillway", US Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center, (2000).

6. Yildiz, D. and Uzucek, E.," Modelling the Performance of Labyrinth Spillways", *International Journal on Hydropower & Dams*, Vol. 3, pp. 71-76, (1996).

7. Hay, N. and Taylor, G.," Performance and Design of Labyrinth Weirs", *Journal of the Hydraulic Division*, vol. 96, pp. 38-42, (1970).

8. Houston, K.L., "Hydraulic Model Study of Ute Dam Labyrinth Spillway," Report GR-82-7, Bureau of Reclamation, (1982).

9. Lux, F . and Hinchliff., "Design and Construction of Labyrinth Spillways", 15th congress ICOLD, Vol. 4, pp. 249-274, (1985).
10. Tullis, J. P., Amanian, N. and Waldron, D., "Design of Labyrinth Spillways", *Journal of hydraulic engineering*, Vol. 121, pp. 247-255, (1995).
11. Wormleaton, P. R. and Soufiani, E., "Aeration Performance of Triangular Planform Labyrinth Weirs", *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 124, pp. 709-719, (1998).
12. Tullis, B. P., Young .J. and Chandler, M., "Head-discharge Relationships for Submerged Labyrinth Weirs", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 133, pp. 248-254, (2007).
13. Khode, B., Tembhurkar, A., Porey, P, and Ingle. R., "Experimental Studies on Flow Over Labyrinth Weir", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 138, pp. 548-552, (2011).
14. Crookston, B. and Tullis, B. P., "Arced Labyrinth Weirs", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 138, pp. 555-562, (2012).
15. Christensen, N. A., "Flow Characteristics of Arced Labyrinth Weirs", (2012).
۱۶. ملت، محمد حسین و بیات، حبیب اله، «تأثیر شیب کف پایین‌دست آستانه‌های کنگره‌ای بر روی عملکرد هیدرولیکی آن»، کنفرانس بین‌المللی دریای آزاد هیدرولیکی، (۱۳۸۰).
۱۷. اژدری مقدم، مهدی و امانیان، نصرت اله و جعفری ندوشن، احسان، «بررسی اثر شیب بالادست و پایین‌دست مقطع بر ضریب آبگذری جریان و سرریز کنگره‌ای مثلثی به روش cfd»، نهمین کنفرانس هیدرولیک، (۱۳۸۹).
۱۸. قدسیان، مسعود و مهرآئین، مجتبی و گودرزی، میلاد، «تأثیر شیب دیوارهٔ بالادست بر ضریب آبگذری سرریز کنگره‌ای انحنادار»، پذیرفته‌شده برای انتشار نشریهٔ عمران مدرس، (۱۳۹۲).
19. Ettema, R., "Hydraulic Modeling: Concepts and Practice", ASCE Publications, (2000).
20. Mehraein, M. and Ghodsian, M., "Discussion of Experimental Studies on Flow over Labyrinth Weir", by BV Khode, AR Tembhurkar, PD Porey, and RN Ingle, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 139, pp. 1056-1056, (2013).